ELEMENTE DE OPTICĂ ONDULATORIE

1. Dispersia luminii

Lumina este un ansamblu de unde electromagnetice cu lungimea de undă cuprinsă între 750 nm şi 400 nm. Acesta unde sunt numite culori: Roşu, Orange, Galben, Verde, Albastru, Indigo, Violet şi sunt recepționate, „simțite" de noi cu ajutorul ochilor. Altfel spus, ochiul este un receptor și un organ de simț în același timp.

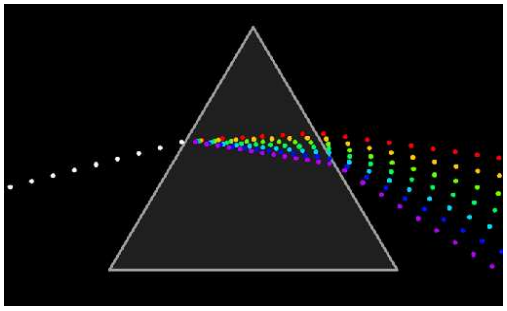


Fig. 1d

În mod obișnuit, toate aceste unde se propagă împreună, formând un „pachet", pe care îl vom numi *lumină.* Când se propagă împreună, ca pachet, aceste culori nu se disting și formează ceea ce in mod obișnuit numim *lumină*. Din cele spuse până acum se poate deduce că ALBUL și NEGRUL nu sunt culori.

Atunci când acest pachet întâlnește un anumit mediu (de exemplu o prismă optică, Fig. 1d) se desface, iar culorile care îl compun se împrăștie, dispersează. Cuvântul provine din limba latină: d*ispergo, -ere – a împrăștia, a risipi.*

Fig. 2d

Un fenomen care evidențiază fenomenul de dispersie a luminii este curcubeul, Fig. 2d.

Mediul în care lumina dispersează se numește ***mediu dispersiv***. Toate mediile sunt dispersive, cu excepția vidului și a aerului, cu anumite aproximații. Acest lucru se datorează faptului că în vid și în aer toate undele electromagnetice se propagă cu aceeași viteză, indiferent de lungimea lor de undă.

În mediile dispersive undele, cu lungimi de undă diferite se propagă cu viteze diferite, adică v=v(λ).

Indicele de refracție a fost definit ca raportul: $\mathbf{n = \frac{c}{v}}$

unde **c** este viteza luminii în vid, iar **v** este viteza undei în mediul respectiv. Concluzionând cele de mai sus rezultă, în mod evident că indicele de refracție depinde de lungimea de undă: **n=n(λ).**

Definim dispersia luminii fenomenul de variație a indicelui de refracție cu lungimea de undă.

În mod normal, indicele de refracție scade lent cu creșterea lungimii de undă. Acest fenomen se numește ***dispersie normală***.

2. Interferența luminii

Două sau mai multe unde luminoase se pot suprapune într-un anumit loc din spaţiu. Dacă intensitatea în domeniul de suprapunere variază trecând prin maxime şi minime se spune că se produce *interferenţă,* vezi Unde mecanice, 4. Interferența undelor. Pentru explicarea condiţiilor de producere a interferenţei trebuie să ţinem seamă că la suprapunerea undelor se adună elongaţiile câmpurilor fiecărei unde (şi nu intensităţile lor). *Undele,* care în acest caz interferă, se numesc *coerente* iar *sursele* care le emit sunt de asemenea *coerente*. Sursele reale de lumină nu sunt surse coerente (excludem aici sursele laser). Radiaţia emisă de aceste surse rezultă în urma tranziţiilor care au loc în atomii constituenţi; aceştia emit independent unul de altul, fără nici o corelaţie între ei, orientarea vectorilor câmp electric fiind haotică.

Obţinerea undelor coerente pentru realizarea interferenţei se face separând din fluxul luminos emis de o sursă monocromatică două fascicule de lumină care ulterior se suprapun din nou în zona de interferenţă. In acest scop se utilizează numeroase dispozitive, care se încadrează în două metode:

- metoda divizării frontului de undă (exemplu: dispozitivul lui Young);
- metoda divizării amplitudinii (exemplu: lama cu feţe plan paralele).

Dispozitivul lui Young constă dintr-o sursă de lumină monocromatică (un bec cu incandescenţă având un filtru în faţa sa) urmat de un paravan prevăzut cu două fante dreptunghiulare şi paralele S_1 şi S_2 şi apoi un ecran pe care se observă interferenţa, Fig. 1i; 2i. Conform principiului lui Huygens, punctele de

pe frontul de undă care atinge fantele emit noi unde, cele două fante devenind surse coerente, deoarece undele emise de ele provin de pe aceeaşi suprafaţă de undă.

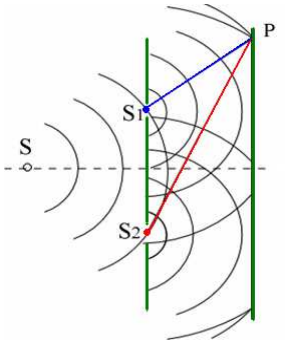


Fig. 1i

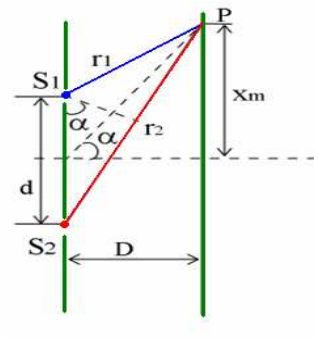


Fig. 2i

Fie *d* distanţa dintre fante, r_1 şi r_2 distanţele de la fante până la un punct oarecare de pe ecranul aflat la distanţa *D* de paravan. Se observă că intensitatea luminoasă va fi maximă în punctul P atunci când diferenţa de drum $\delta = r_2 - r_1 = 2k\frac{\lambda}{2}$, unde $k = 0;\pm1;\pm2;...$ şi va fi minimă (în acest caz, nulă) când diferenţa de drum $\delta = r_2 - r_1 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ Ca rezultat al interferenţei, pe ecran vor apare *franje* luminoase alternând cu altele întunecoase (maxime şi minime) paralele cu fantele. Distanţa dintre două franje luminoase (întunecoase) succesive se numeşte *interfranjă*. Distanţa x_m a franjei luminoase de ordinul *m* faţă de planul de simetrie al dispozitivului se poate determina observând că $tg\alpha = x_m / D$ şi $\sin\alpha = (r_2 - r_1)/d = k\lambda/d$.

Dar cum unghiul α este mic : $tg\alpha \cong \sin\alpha$, se obţine: $x_m = \frac{kD\lambda}{d}$

Fig. 3i

Interfranja este distanţa dintre două maxime succesive, zone luminoase, sau întunecoase, ca în Fig. 3i.

$$i = x_{m+1} - x_m = \frac{D\lambda}{d}$$

Dacă spaţiul dintre paravanul cu fante şi ecran este un mediu cu indicele de refracţie *n* , în locul drumului geometric *r* intervine drumul optic : $(r) = nr$.

Lama cu feţe plan-paralele. Fie o lamă de grosime ***d*** şi indice de refracţie ***n*** pe care cade o rază de lumină (1) sub unghiul de incidenţă ***i*** .(Fig. 3) .

După reflexii pe faţa superioară şi pe cea inferioară a lamei, se obţin razele (2) şi (3) care sunt coerente provenind din aceeaşi undă,

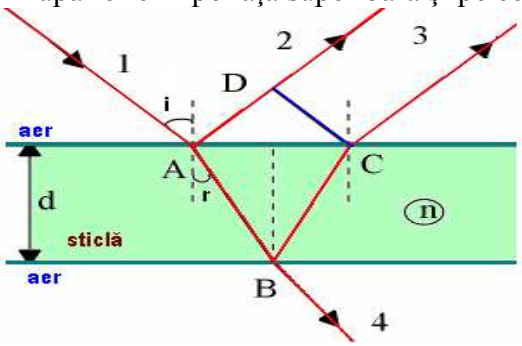


Fig. 4i

dar sunt defazate deoarece parcurg drumuri optice diferite după separarea lor în punctul A şi până la refacerea frontului de undă CD.

Diferenţa de drum optic este:

$$\delta = (L_3) - (L_2) = n(AB - BC) - (AD - \frac{\lambda}{2})$$

Raza (2) suferă reflexie pe un mediu mai dens şi din această cauză "pierde" $\frac{\lambda}{2}$, adică suferă un salt de fază egal cu π .

Exprimând segmentele *AB=BC* şi *AD* în funcţie de unghiul de incidenţă **i**, de unghiul de refracţie **r** şi de grosimea lamei **d** , se obţine:

$$\delta = 2nd\cos r + \frac{\lambda}{2}$$

În cazul incidenţei normale (**i = 0**) şi din legea a doua a refracţiei $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

rezultă cos r = 1, astfel că diferenţa de drum optic devine:

$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2}$$

Toate razele paralele pot fi adunate într-un loc cu ajutorul unei lentile convergente şi vor interfera, producând maxime sau minime, după cum diferenţa de drum optic este un număr par sau impar de semilungimi de undă.

APLICAŢII

Interferenţa produsă de lame subţiri are multe aplicaţii dintre care amintim **straturile antireflex,** pe de o parte, şi **straturile reflectătoare**, pe de altă parte. Straturile antireflex sunt pelicule subţiri depuse pe suprafaţa componentelor optice (lentile). Grosimea lor este astfel aleasă încât razele reflectate să fie stinse (diferenţa de drum dată de să corespundă unui minim de interferenţă). Dacă, dimpotrivă, diferenţa de drum între razele reflectate pe feţele stratului corespunde unui maxim de interferenţă atunci razele reflectate sunt "întărite" şi stratul este puternic reflectător (oglindă). O altă aplicaţie a interferenţei în straturi subţiri se referă la realizarea filtrelor interferenţiale , care permit trecere unei culori bine determinate prin filtru.

O altă aplicaţie a fenomenului de interferenţă este **holografia**.

Holografia este o tehnică pentru înregistrarea şi reproducerea imaginilor obiectelor pe cale interferenţială. Spre deosebire de imaginile bidimensionale realizate prin fotografie sau televiziune, imaginea holografică este tridimensională. O astfel de imagine poate fi cercetată din diferite direcţii spre a vedea laturi diferite ale obiectului.

Pentru obţinerea hologramei, obiectul este iluminat cu lumină monocromatică şi coerentă, furnizată de o sursă laser, iar lumina reflectată de obiect ajunge pe o placă fotografică, unde se suprapune cu lumina care soseşte direct de la sursă, producând interferenţă. Pe film se imprimă o imagine complexă de interferenţă, în locurile de maxim filmul fiind mai înnegrit. Pentru a vedea imaginea obiectului , filmul se iluminează cu aceeaşi lumină monocromatică şi coerentă de la o sursă laser, ca şi la înregistrare.

După developarea filmului şi obţinerea pozitivului, inelele de maxim vor corespunde zonelor transparente ale filmului. Pentru redare, se iluminează filmul (holograma) cu unde luminoase monocromatice plane, de aceeaşi lungime de undă ca la înregistrare.

3. Difracţi luminii

Dacă lumina s-ar propaga sub forma unor raze rectilinii, ar trebui ca umbra unui corp opac iluminat cu un fascicul de raze paralele, să fie net delimitată iar trecerea de la umbră (0%) la lumina (100%) să se facă brusc.

În realitate, trecerea nu este câtuşi de puţin bruscă! Zona întunecată începe să se lumineze treptat, încă înainte de linia de proiecţie geometrică a corpului opac. Iar în zona de proiecţie geometrică a regiunii luminate, apar o serie de zone alternativ mai intens şi respectiv mai slab luminate. Aceste fenomene sunt determinate de difracţia luminii, iar zonele alternative mai întunecate şi mai luminoase poarta numele de **franje de difracţie**. După cum se observă în Fig. 1D, franjele de difracţie se deosebesc de

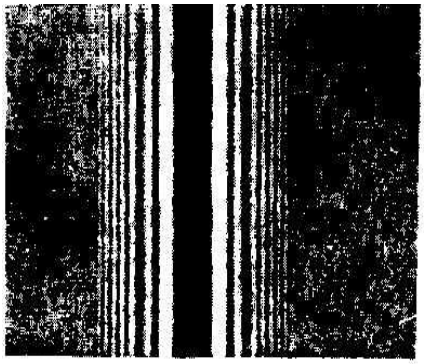


Fig.1D

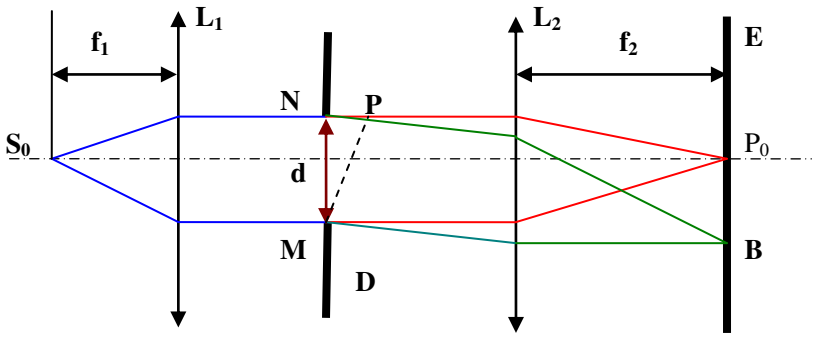


Fig. 2D

franjele de interferenţă, Fig. 3i.

Difracţia este importantă în fotografie deoarece apare la trecerea luminii printr-o fantă şi anume diafragma obiectivului. În studiul difracţiei, modelul experimental este chiar un obiectiv diafragmat. O sursa de lumina **So**, aflată in focarul lentilei $\mathbf{L_1}$, determina producerea unui fascicul de raze paralele care

traversează o fantă **D** (diafragma) cu o deschiderea **d**. O a doua lentilă, $\mathbf{L_2}$ proiectează imaginea pe un ecran E, Fig. 2D. Conform principiului lui Huygens, diafragma devine sursă secundară de lumină şi emite raze în toate direcţiile.

Apariţia difracţiei în obiectivele diafragmate

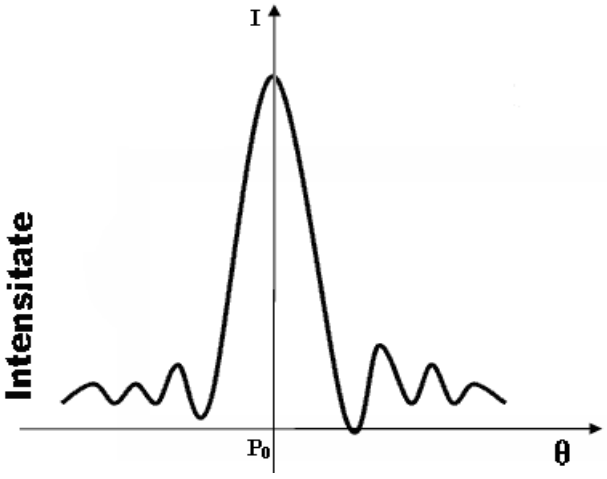


Fig. 3D

Analizând comportamentul razelor marginale (tangente la deschiderea d) care se proiectează in focarul lentilei L_2, F, adică pe axa optică, observam ca nu implică diferenţe de drum optic şi deci nu există diferenţe de fază, iar imaginea proiectată va fi cea aşteptată. Dacă însă analizăm imaginea proiectată în punctul B pe ecranul E, observăm că apare o diferenţă de drum optic între raza superioară BN şi raza inferioară BM, Fig. 2D. Aceasta creează la nivelul ecranului E, in punctul B, o iluminare a cărei variaţie este redată aproximativ în Fig. 3D.

Se poate demonstra că difracţia este proporţională cu lungimea de undă a luminii şi invers proporţională cu deschiderea **d**.

Reţeaua de difracţie. O reţea de difracţie este formată dintr-un ansamblu de N fante identice, paralele şi echidistante (Fig. 4D). Distanţa l dintre două fante succesive se numeşte **constanta reţelei.**

Cele N fante ale reţelei se pot interpreta ca fiind sursele a N fascicule coerente care au, pentru direcţia θ, diferenţa de fază între două unde succesive $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} l \sin\theta$, corespunzătoare diferenţei de drum $d \sin\theta$.

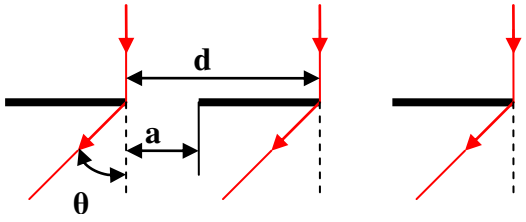


Fig. 4D

Intensitatea fiecăreia din aceste unde, în direcţia θ, este cea rezultată în urma difracţiei prin fanta de lăţime a .

Reţeaua respectivă va avea un număr $n = \frac{N}{L}$ de trăsături pe unitatea de lungime şi o distanţă $d = \frac{L}{N} = \frac{1}{n}$ între două trăsături succesive. Această distanţă se numeşte **constanta reţelei**.

În Fig. 5D şi Fig. 6D este redată schematic experienţa cu o reţea de difracţie.

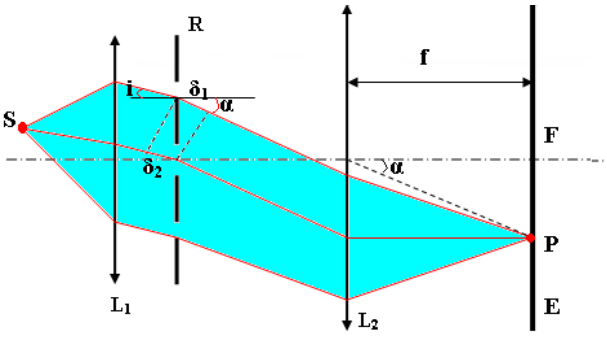


Fig. 5D

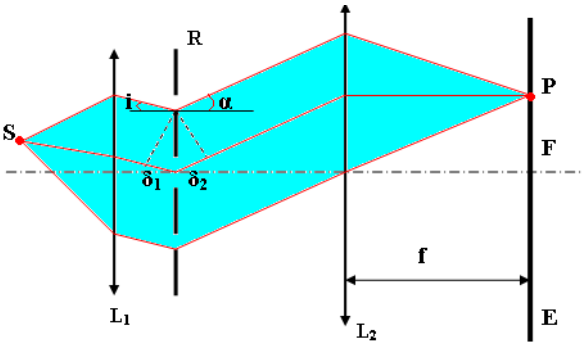


Fig. 6D

Un fascicul de lumină monocromatică, provenit de la un izvor S, transformat într-un fascicul paralel de către lentila L_1, cade sub un unghi de incidenţă i pe reţeaua R. Figura de difracţie se va vedea în planul focal al lentilei L_2, pe ecranul E. Distribuţia intensităţii luminoase în figura de difracţie poate fi calculată pornind de la principiul Huygens – Fresnel, potrivit căruia fiecare fantă a reţelei devine sursă de unde secundare, pentru fiecare radiaţie monocromatică în parte.

După cum se vede în Fig. 5D şi Fig. 6D, între două unde va exista mereu o diferenţă de drum optic $\delta = \delta_1 \pm \delta_2$, unde $\delta_1 = d\sin i$ reprezintă diferenţe de drum optic între undele incidente pe reţea, iar $\delta_2 = d\sin\alpha$ reprezintă diferenţe de drum optic difractate sub unghiul α. Deci:

$$\delta = d(\sin i \pm \sin\alpha)$$

În punctul P vom obţine un maxim dacă $\delta = k\lambda$, respectiv un minim, dacă $\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$.

În cazul incidenţei normale (i = 0) $\delta = d\sin\alpha$.

4. Polarizarea luminii

Lumina, așa cum am spus deja, este un pachet de unde electromagnetice, cu lungimea de undă cuprinsă între aproximativ 400 şi 750 nm. Unda luminoasă elementară, este emisă la dezexcitarea unui atom, care se comportă analog unui dipol electric (ca o antenă). **Vectorul câmp electric al undei luminoase, numit şi vector luminos** (deoarece determină senzaţia de lumină) **este perpendicular pe direcţia de propagare a luminii**, la fel şi vectorul câmp magnetic. Datorită acestei caracteristici spunem despre undele electromagnetice că sunt unde transversale (vezi Unde mecanice).

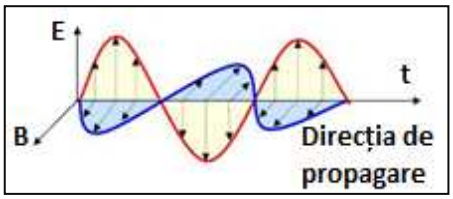


Fig. 1P

Vectorul câmp electric al undei elementare oscilează perpendicular pe direcţia de propagare cu aceeaşi probabilitate în toate direcţiile, (Fig.1P). Mai intuitiv spus, lumina naturală se propagă ca un tub, ca un cilindru, a cărui rază este modulul vectorului **E**, Fig. 2P. Atunci când această rază de lumină se reflectă pe o suprafață, din infinitatea de suprafețe, de direcții de vibrație a vectorului luminos, se separă doar o suprafață care conține o direcția de vibrație, care va fi numită de acum direcție privilegiată de vibrație. Acest tip de polarizare se numește ***polarizare prin reflexie,*** Fig. 3P.

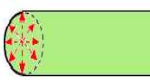


Fig. 2P

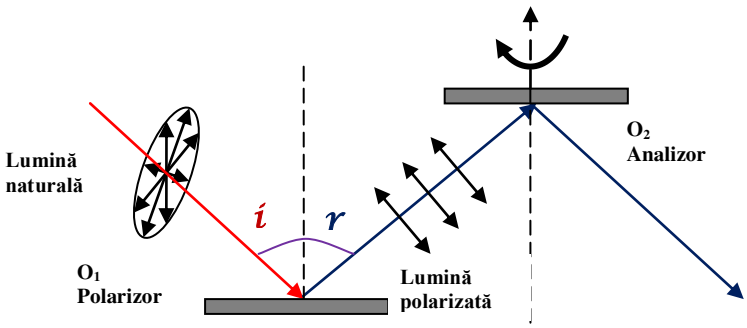


Fig. 3P

Din cele expuse până acum deducem că: **polarizarea luminii este fenomenul de separare a direcției privilegiate de oscilație a vectorului luminos, din infinitatea de direcții posibile de oscilație.**

Atenţiune: direcţia privilegiată de vibraţie nu este aleasă întâmplător! Direcţia privilegiată de vibraţie este direcţia conţinută în planul de reflexie – planul care conţine razele incidentă, reflectată şi normala, Fig. 3P.

Oglinda pe care se face reflexia de polarizare se numeşte **polarizor**. Fenomenul nu poate fi observat încă. Pentru a putea observa fenomenul de polarizare, lumina trebuie să mai sufere o reflexie pe o a doua oglindă. Această oglindă se numeşte **analizor**. De fapt, ce vom observa?

Vom observa că dacă rotim oglinda O_2 în jurul unui ax perpendicular pe planul său intensitatea luminoasă a razei reflectate creşte sau scade. Intensitatea luminoasă a razei reflectată pe analizor este maximă atunci când planele reflexie ale celor două oglinzi coincid şi este minimă sau zero atunci când cele două plane sunt perpendiculare. D. Brewster demonstrează că intensitatea luminoasă a undei reflectate este zero atunci când unghiul de incidență are valoarea i_B, numit unghi Brewster. Valoarea unghiului i_B este dată de relația:

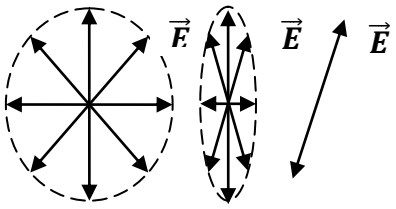
$$tgi_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Cunoscută sub numele de legea lui Brewster, unde n_1 este indicele de refracție al mediului de unde vine lumina, iar n_2 este indicele de refracție al mediului pe care se reflectă lumina. De exemplu, în cazul reflexiei aer-sticlă $i_B = 57^o$

OBSERVAȚIE:

1. Atunci când intensitatea luminoasă a undei reflectate este zero spunem că lumina este total polarizată, sau liniar polarizată. În acest caz există o singură direcție privilegiată de vibrație, Fig. 4Pc).

2. Atunci când intensitatea luminoasă a undei reflectate este minimă, dar diferită de zero spunem că lumina este parțial polarizată, Fig. 4Pb). În acest caz există o singură direcție predominantă de vibrație, dar nu unică. Despre lumina parțial polarizată putem spune că este un amestec de lumină naturală și lumină total polarizată.



a) b) c)

Fig. 4P

ACESTA ESTE FENOMENUL DE POLARIZARE, FENOMEN CARE DEMONSTREAZĂ TRANSVERSALITATEA UNDELOR ELECTROMAGNETICE!

Observație: 1. Dacă separarea direcției privilegiate se produce ca urmare a fenomenului de reflexie, fenomenul se numește ***polarizare prin reflexie***.

Probleme

1. Frecvenţe unei radiaţii luminoase este $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ s^{-1}. Să se calculeze lungimea de undă a acestei radiaţii în sticlă cu indicele de refracţie n = 1,5.

REZOLVARE:

$\nu = 5\ 10^{14}\ s^{-1}$

$n = 1,5$

$\lambda = ?$

$\lambda = \nu \cdot T = \frac{\nu}{v}$, $n = \frac{c}{v} \Rightarrow \nu = \frac{c}{n}$

Rezultă în continuare $\lambda = \frac{c}{n\nu} = 400nm$

2. În experienţa lui Young se lucrează cu o radiaţie monocromatică cu $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ m. Distanţa dintre fante este 1 mm, iar distanţa de la fante la ecran 3 m. Să se găsească poziţia primelor trei franje luminoase.

REZOLVARE:

$\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ m

d = 1 mm

D = 3 m

$x_k = ?$

$k = 0,1,2$

$x_k = \frac{k\lambda D}{d}$. Înlocuind şi dând lui k valorile 0,1,2, obţinem:

$x_1 = 0$, $x_2 = 1,8$ mm şi $x_3 = 3,6$ mm

1. M. Popesscu, V. Tomescu, M, Strazzaboschi, M. Sandu – FIZICĂ, manual pentru clasa a XI-a, Editura Crepuscul – 2006.
2. G. Enescu, N. Gherbanovschi, M. Prodan, Șt. Levai – FIZICĂ, manual pentru clasa a XI-a, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1994.
3. http://dex-online.ro
4. http://wikipedia.org/ , http://ro.wikipedia.org/
5. http://www.walter-fendt.de/ph14ro

OBSERVAȚIE: Cuvintele de culoare albastră, subliniate conțin hyperlink-uri. Accesându-le obțineți informații suplimentare. De asemenea, dacă puneți prompterul pe anumite imagini vi se va deschide un link.